·环境与职业卫生·

陕西产黄芪、杜仲叶和山茱萸中五种重金属污染特征及健康风险评估

袁文婷[1],王彩霞[1],刘存卫[1],刘军锋[2],刘宇[1]
1.陕西省疾病预防控制中心,理化检验所,陕西 西安 710052;2.陕西省中医医院中医药发展服务中心

摘要:目的　评估陕西地产黄芪、杜仲叶和山茱萸中铅(Pb)、镉(Cd)、砷(As)、汞(Hg)、铜(Cu)的污染水平及健康风险,为安全性评价和标准制定提供依据。**方法**　采集陕西主要产区的黄芪、杜仲叶和山茱萸样本,采用微波消解－电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定五种重金属含量,并利用单因子污染指数和内梅罗综合污染指数评估污染水平,将健康指导值或基准剂量值与人体暴露量进行比较以评估健康风险。**结果**　黄芪和山茱萸的单因子污染指数和内梅罗综合污染指数均<0.7,表明重金属污染程度低,处于安全水平;杜仲叶的内梅罗综合污染指数为 0.79,处于警戒线水平,主要污染源为铅和汞,需关注其种植与加工过程中的污染控制。三种食药物质通过食用途径的暴露量均高于药用途径的摄入量。黄芪、杜仲叶和山茱萸食用途径铅暴露量分别为 0.107、0.698 和 0.266μg/(kg·BW);砷暴露量分别为 0.108、0.138 和 0.039 μg/(kg·BW);镉暴露量分别为 0.007、0.060 和 0.011μg/(kg·BW);汞暴露量分别为 0.002、0.031 和 0.007 μg/(kg·BW);铜暴露量为 2.611、1.979 和 0.987 μg/(kg·BW)。**结论**　陕西产黄芪和山茱萸中重金属污染风险较低,杜仲叶中铅和汞的污染需持续关注。在考虑膳食暴露的情况下,三种食药物质中的重金属暴露风险均在可接受范围内。

关键词:食药物质;黄芪;杜仲叶;山茱萸;重金属
中图分类号:R284.1　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1003-8507(2025)23-4291-06
DOI:10.20043/j.cnki.MPM.202504519

Heavy metal contamination characteristics and health risk assessment in Astragalus, Eucommia ulmoides leaves, and Cornus officinalis from Shaanxi, China

YUAN Wen-ting*, WANG Cai-xia, LIU Cun-wei, LIU Jun-feng, LIU Yu
Physical and Chemical Laboratory, Shaanxi Provincial Center for Disease Control and Prevention, Xi'an, Shaanxi 710052, China

Abstract: Objective To assess the contamination levels and health risks of lead (Pb), cadmium (Cd), arsenic (As), mercury (Hg), and copper (Cu) in Astragalus, Eucommia ulmoides leaves, and Cornus officinalis from Shaanxi Province, providing a scientific basis for safety evaluation and standard establishment. **Methods** Samples of Astragalus, Eucommia ulmoides leaves, and Cornus officinalis were collected from major producing areas in Shaanxi. The concentrations of the five heavy metals were determined using microwave digestion-inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The contamination levels were evaluated using the single-factor pollution index and the Nemerow composite pollution index, while health risks were assessed by comparing health guidance values or benchmark doses with estimated human exposure levels. **Results** Both the single-factor pollution index and the Nemerow composite pollution index values for Astragalus and Cornus officinalis were below 0.7, indicating low heavy metal contamination and a safe consumption level. In contrast, Eucommia ulmoides leaves exhibited a Nemerow composite pollution index of 0.79, reaching the alert threshold, with Pb and Hg identified as the primary contaminants, necessitating stricter control during cultivation and processing. For all three food and medicinal substances, the exposure levels via dietary intake were higher than those via medicinal use. For Astragalus, Eucommia ulmoides leaves, and Cornus officinalis, the Pb exposure levels via dietary intake were 0.107 μg/kgBW, 0.698 μg/kgBW, and 0.266 μg/kgBW, respectively. The As exposure levels were 0.108 μg/kgBW, 0.138 μg/kgBW, and 0.039 μg/kgBW, respectively. The Cd exposure levels were 0.007 μg/kgBW, 0.060 μg/kgBW, and 0.011 μg/kgBW, respectively. The Hg exposure levels were 0.002 μg/kgBW, 0.031 μg/kgBW, and 0.007 μg/kgBW, respectively. The Cu exposure levels were 2.611 μg/kgBW, 1.979 μg/kgBW, and 0.987 μg/kgBW, respectively. **Conclusion** Astragalus and Cornus officinalis from Shaanxi

基金项目:陕西省自然科学基础研究计划项目(2024JC-YBMS-192)
作者简介:袁文婷(1989—),女,硕士,助理研究员,研究方向:食品安全风险监测
通信作者:刘宇,E-mail:610715994@qq.com

pose minimal heavy metal contamination risks, whereas Eucommia ulmoides leaves require targeted monitoring for Pb and Hg. When dietary exposure was considered, the heavy metal exposure risks for all three food and medicinal substances were within acceptable limits.

Keywords: Food and medicinal substances; Astragalus; Eucommia ulmoides leaves; Cornus officinalis; Heavy metals

2023 年 11 月，国家卫生健康委发布公告，将党参、肉苁蓉、铁皮石斛、西洋参、黄芪、灵芝、山茱萸、天麻、杜仲叶等物质纳入既是食品又是中药材的物质（简称食药物质）目录[1]。在种植、运输、储存和加工过程中，食药物质可能会受到重金属、农药残留等外源性污染物的污染[2]。目前对于食药物质中重金属的研究多集中于含量调查和污染状况分析[3-4]，关于其中重金属在人体内的暴露评估报道较少。陕西地处西北，背靠秦岭，因其得天独厚的自然资源和气候条件，成为我国中药材资源丰富的省份之一，黄芪、杜仲和山茱萸均有广泛的种植规模。2022 年，陕西省卫生健康委和市场监督管理局联合印发《试点方案》，对子洲县黄芪、略阳县杜仲叶、佛坪县山茱萸开展试点工作。本研究采集陕西省地产黄芪、杜仲叶和山茱萸样本，依据《中国药典》和《药用植物及制剂进出口绿色行业标准》中对于重金属限量的要求[5]，检测其中铅、镉、砷、汞、铜的含量，采用单因子污染指数和内梅罗综合污染指数评价其重金属污染程度[6]，分别评估其通过药物服用和膳食摄入两种途径的暴露风险[7]，以期为黄芪、杜仲叶和山茱萸的安全性评价提供参考，为地方标准制定和健康风险评估提供数据支撑。

1　材料与方法

1.1　样品采集和处理　基于陕西省黄芪、杜仲叶和山茱萸的地理分布特征和种植规模，采用分层抽样方法，在榆林市、汉中市、商洛市、安康市、咸阳市和宝鸡市等六大产区采集样本。为了确保样本的代表性，样本量分配与各产区的实际种植和生产规模成正比，种植和收购环节比例为 1∶1，其中种植环节是在种植户家中采集，收购环节是在当地的收购站或药材公司采集，根据食用习惯和入药部位，黄芪采集根部，杜仲叶采集叶部，山茱萸采集果实，所有样品均采集干样。具体采样方案如下：榆林市作为黄芪主产区采集 72 份，宝鸡市和咸阳市各采集 11 份，黄芪样本共计 94 份；汉中市作为杜仲叶主产区采集 82 份，安康市采集 22 份，杜仲叶样本共计 104 份；在汉中市、商洛市、宝鸡市和安康市分别采集山茱萸 64、22、14 和 8 份，山茱萸样本共计 108 份。样品采集后装入聚乙烯袋，室温储存和运输。送回实验室，去除杂质，清洗数次后再用去离子水冲洗三次，晾干。取适量样品粉碎、混匀待测。

1.2　仪器与试剂　电感耦合等离子体质谱联用仪（8800，美国安捷伦公司）；微波消解仪（Mars6，美国 CEM 公司）；赶酸仪（BHW-090，上海博通化学科技有限公司）；超纯水制备系统（Milli-Q，德国默克公司）；分析天平（QUINTIX224-10CN，德国赛多利斯公司）；多功能破碎机（S025，艾卡仪器设备有限公司）；多元素标准溶液（5183-4688，10 μg/ml，美国安捷伦公司）；汞单元素标准物质（GBW08617，1 000 μg/ml，中国计量科学院）；硝酸（优级纯，德国默克公司）。

1.3　样品检测　根据食品安全国家标准 食品中多元素的测定（GB 5009.268-2016）进行铅、镉、砷、汞、铜含量的测定[8]。称取一定量的样品加入 8 ml 硝酸，静置一夜后放入微波消解仪中进行消解，消解完成后取出冷却至室温，在 100 ℃下加热 30 min，用超纯水少量多次冲洗消解管，合并洗涤液并定容至 25 ml，摇匀待测，同时做空白实验。使用电感耦合等离子体质谱仪测定铅、镉、砷、汞、铜的含量。铅和砷的检出限均为 0.004 mg/kg，镉的检出限为 0.003 mg/kg，铜的检出限为 0.01 mg/kg，汞的检出限为 0.001 mg/kg；方法的加标回收率在 89.0%～112.3%之间，相对标准偏差（relative standard deviation，RSD）小于 10%，满足测定要求。采用空白实验、20%平行双样和有证参考物质的方式进行质量控制，保证数据准确可靠。

1.4　重金属污染状况分析　采用单因子污染指数和内梅罗综合污染指数评价黄芪、杜仲叶和山茱萸中重金属污染。单因子污染指数法：$P_i=C_i/S_i$。其中，P_i 为污染物的单项污染指数；C_i 为污染物测定值，mg/kg；S_i 为评价标准中污染物的限值，mg/kg，P_i 越大，受污染程度越严重。内梅罗综合污染指数法：$P_{综合}=[(P_{iave}^2+P_{imax}^2)]/2$。其中，$P_{综合}$ 为内梅罗综合污染指数；P_{iave} 为各重金属单因子污染指数平均值；P_{imax} 为重金属单项污染指数中最大值。$P_{综合}$ 能反映各重金属对食药物质的综合影响。污染分级标准见表 1[6]。

表 1　重金属污染分级

Table 1　Heavy metal pollution classification

分级	单项污染		综合污染	
	污染指数	污染等级	污染指数	污染等级
1	$P_i\leq0.7$	优良	$P_{综}\leq0.7$	安全
2	$0.7<P_i\leq1$	清洁	$0.7<P_{综}\leq1$	警戒线
3	$1<P_i\leq2$	轻度污染	$1<P_{综}\leq2$	轻度污染
4	$2<P_i\leq3$	中度污染	$2<P_{综}\leq3$	中度污染
5	$P_i>3$	重度污染	$P_{综}>3$	重度污染

《关于党参等 9 种新增按照传统既是食品又是中药材的物质公告》和《2020 版中国药典》中关于黄芪、杜仲叶和山茱萸中重金属限量要求见表 2。从保守评估的角度出发，选择限值较低者来判定重金属超标情况：黄芪中铅＞1.0 mg/kg，镉＞0.5 mg/kg，砷＞0.5 mg/kg，汞＞0.1 mg/kg，铜＞20 mg/kg；杜仲叶中铅＞2.0 mg/kg，镉＞0.5 mg/kg，砷＞1.0 mg/kg，汞＞0.1 mg/kg，铜＞20 mg/kg；山茱萸中铅＞1.0 mg/kg，镉＞0.1 mg/kg，砷＞0.5 mg/kg，汞＞0.1 mg/kg，铜＞20 mg/kg。所有限量值均以干重计。

表 2　三种食药物质中重金属限量

Table 2　Heavy metal limits in three food and medicinal substances

物质名称	来源	重金属限量值(mg/kg)				
		铅	镉	砷	汞	铜
黄芪	2020 版中国药典	5.0	1.0	2.0	0.2	20
	公告[a]	1.0	0.5	0.5	0.1	—[b]
杜仲叶	2020 版中国药典	—	—	—	—	—
	公告	2.0	0.5	1.0	0.1	—
山茱萸	2020 版中国药典	5.0	1.0	2.0	0.2	20
	公告	1.0	0.1	0.5	0.1	—

注：[a]“公告”代表《关于党参等 9 种新增按照传统既是食品又是中药材的物质公告》；[b]“—”表示暂无相关重金属限量规定。

1.5　重金属暴露风险评估　采用确定性评估方法，将各重金属在人体中的暴露量(exposure)与每日可接受摄入量(acceptable daily intake，ADI)或基准剂量下限值（bench mark dose lower confidence Limit，BMDL）进行比较来评估暴露风险。人体暴露量计算公式为：

$$暴露量 = \frac{F \times C}{W} \times f$$

其中：暴露量为某个体每天每公斤体重某种重金属的摄入量，μg/（kg·BW）；F 为个体的日均消费量，g/d；C 为重金属含量，mg/kg；W 为个体的体重，kg，本研究中选择成年人平均体重 60 kg[6]；f 为服用频率。

铅的 BMDL 为 1.3 μg/（kg·BW）[9]，无机砷的 BMDL 为 3～5 μg/(kg·BW)[10]，从保守评估角度考虑，本研究以总砷代替无机砷进行评价，选择 3.0 μg/(kg·BW) 作为砷的 BMDL。镉的每月耐受摄入量为 25 μg/（kg·BW）[10]，总汞的每周耐受摄入量为 4 μg/(kg·BW)[11]，铜的理论最大日摄入量为 500 μg/（kg·BW）[12]。为方便计算和比较，将上述值换算成 ADI，分别为镉 0.83 μg/(kg·BW)、汞 0.57 μg/(kg·BW)、铜 500 μg/(kg·BW)。

1.6　统计学方法　采用 Excel 2007 和 SPSS 25.0 软件进行数据处理和统计分析。未检出数据用检出限的 1/2 替代[13-14]。

2　结　果

2.1　重金属检测结果分析　黄芪、杜仲叶和山茱萸中铅含量均值分别为 0.209、1.368 和 0.522 mg/kg；铅超标率由高到低分别为杜仲叶、山茱萸和黄芪，分别为 16%、13%、1%，其中两份采集于汉中市的杜仲叶中铅含量分别为 5.049 和 4.968 mg/kg，超出铅的限量值 2 倍以上，存在安全隐患；一份采集自汉中市的山茱萸中铅含量为 4.946 mg/kg，是铅限量值的 4.9 倍；仅有一份黄芪中铅超标，其含量为 1.228 mg/kg。黄芪、杜仲叶和山茱萸中镉的含量均值分别为 0.014、0.118 和 0.022 mg/kg；仅有一份来自汉中市的山茱萸中镉含量超出限量值，为 0.238 mg/kg，黄芪和杜仲叶中的镉含量均未超标。砷含量均值由高到低分别为杜仲叶、黄芪、山茱萸，分别为 0.270、0.211 和 0.077 mg/kg；砷超标样本有一份杜仲叶和三份黄芪。杜仲叶中汞含量均值为 0.061 mg/kg，高于黄芪的 0.004 mg/kg 和山茱萸的 0.014 mg/kg；有五份杜仲叶和四份山茱萸中汞超标，黄芪中汞无超标。黄芪中铜含量最高，为 5.116 mg/kg；杜仲叶和山茱萸中铜含量均值分别为 3.879 和 1.933 mg/kg；所有样本中铜均未超标。黄芪、杜仲叶和山茱萸中重金属含量均值见表3。

表 3　三种食药物质中重金属含量(mg/kg，$\bar{x} \pm s$)

Table 3　Levels of heavy metals in three food and medicinal substances (mg/kg, $\bar{x} \pm s$)

名称	铅	镉	砷	汞	铜
黄芪	0.209 ± 0.201	0.014 ± 0.010	0.211 ± 0.117	0.004 ± 0.010	5.116 ± 1.287
杜仲叶	1.368 ± 0.845	0.118 ± 0.042	0.270 ± 0.184	0.061 ± 0.024	3.879 ± 0.829
山茱萸	0.522 ± 0.638	0.022 ± 0.030	0.077 ± 0.097	0.014 ± 0.034	1.933 ± 1.471

2.2　重金属污染状况分析　黄芪、杜仲叶和山茱萸中重金属污染水平见表 4。黄芪和山茱萸中各项单因子污染指数和内梅罗综合污染指数均小于 0.7，表明黄芪和山茱萸样本受到重金属污染程度较低，处于安全水平。杜仲叶的铅、镉和汞污染指数高于黄芪和山茱萸，分别为 0.68、0.24 和 0.61，单因子污染指数小于 0.7 即认为结果优良，因此杜仲叶中的铅、镉和汞污染仍处于优良水平。但杜仲叶的内梅罗综合污染指数为 0.79，已处于警戒线水平，主要来源于铅和汞的污染，提示杜仲叶中铅和汞的污染应引起关注。

表 4　三种食药物质中重金属污染状况

Table 4　Heavy metal pollution in three food and medicinal substances

名称	单因子污染指数						综合污染指数	
	$P_{铅}$	$P_{镉}$	$P_{砷}$	$P_{汞}$	$P_{铜}$	评价结果	$P_{综}$	评价结果
黄芪	0.21	0.03	0.42	0.04	0.26	优良	0.46	安全
杜仲叶	0.68	0.24	0.27	0.61	0.19	优良	0.79	警戒线
山茱萸	0.52	0.22	0.15	0.14	0.10	优良	0.57	安全

2.3　重金属暴露风险评估　食药物质兼具药品和食品两种属性，分别从药物服用和膳食摄入两方面计算暴露量，同时遵循保护大多数人的保守性原则，确定摄入量如下：(1)作为药物治疗时，参考《2020 版中国药典》中推荐摄入量上限，黄芪为 30 g/d，山茱萸为 12 g/d，杜仲为 10 g/d，假定患者每日服用，服用频率 f 为 1(365/365)；(2)作为膳食摄入时，参考国家食品安全风险评估中心进行的消费量调查[15]，黄芪、杜仲叶和山茱萸的消费量均为 43g/d，年服用天数为 260 d，服用频率 f 为 0.712(260/365)。计算人体通过药用服用和膳食摄入的暴露量。见表 5。

表 5　三种食药物质中重金属日均暴露量[μg/(kg·BW)]

Table 4　Average daily exposure to heavy metals of three food and medicinal substances [μg/(kg·BW)]

名称	暴露量(铅)		暴露量(砷)		暴露量(镉)		暴露量(汞)		暴露量(铜)	
	药用	食用	药用	食用	药用	食用	药用	食用	药用	食用
黄芪	0.105	0.107	0.106	0.108	0.007	0.007	0.002	0.002	2.558	2.611
杜仲叶	0.228	0.698	0.045	0.138	0.020	0.060	0.010	0.031	0.646	1.979
山茱萸	0.104	0.266	0.015	0.039	0.004	0.011	0.003	0.007	0.387	0.987

2.3.1　铅的暴露风险评估　从表 4 中可以看到，通过药用途径下，黄芪、杜仲叶和山茱萸中铅的暴露量分别为 0.105、0.228 和 0.104 μg/(kg·BW)；通过食用途径下，黄芪、杜仲叶和山茱萸中铅的暴露量分别为 0.107、0.698 和 0.266 μg/(kg·BW)。其中通过食用摄入途径杜仲叶中铅的暴露量最高，为 0.698 μg/(kg·BW)，占 BMDL 的 53.6%。有研究显示，我国居民成人膳食铅日均暴露量为 0.54 μg/（kg·BW)[16]，相当于 BMDL 的 41%，因此通过其他途径摄入的铅不超过 BMDL 的 59%，即可认为暴露风险较低，表明黄芪、杜仲叶和山茱萸中铅暴露风险较低。

2.3.2　砷的暴露风险评估　国际上对于砷的 BMDL 是以无机砷制定的，按照欧洲食品安全局评估报告，除水产品外，其他食品类别总砷转换成无机砷的系数是为 70%[17]，本研究以总砷含量代替无机砷含量进行评估，实际上高估了砷的暴露风险。从表 4 中可以看出，三种食药物质通过药用途径的砷暴露量均小于食用途径的暴露量，杜仲叶中砷暴露量高于黄芪和山茱萸。食用途径下杜仲叶中砷暴露量最高，为 0.138 μg/(kg·BW)，相当于无机砷 BMDL 的 4.6%。我国居民的无机砷膳食暴露量为 1.26 μg/(kg·BW)[18]，占无机砷 BMDL 的 42%，通过其它途径的暴露量低于无机砷 BMDL 的 58%即为安全。因此，黄芪、杜仲叶和山茱萸中砷暴露风险较低。

2.3.3　镉的暴露风险评估　镉的每月耐受摄入量为 25 μg/(kg·BW)，换算到 ADI 为 0.83 μg/(kg·BW)，全国范围内镉膳食暴露结果显示，我国人群膳食镉日均暴露量为 0.51 μg/（kg·BW)[18]，相当于镉 ADI 的 61%，因此其他途径镉暴露量低于 39%即可。由表 4 可以看出，三种食药物质中，通过食用途径杜仲叶中镉暴露量最高，为 0.060 μg/(kg·BW)，占镉 ADI 的 7.2%。表明即使加上膳食摄入，黄芪、杜仲叶和山茱萸中镉暴露风险仍然处于安全水平。

2.3.4　汞的暴露风险评估　由于杜仲叶中汞含量高于黄芪和山茱萸，导致其暴露量高于黄芪和山茱萸，杜仲叶在食用途径下暴露量最高，为 0.031 μg/(kg·BW)，占汞 ADI 的 5.4%。有研究报道我国居民膳食汞日均暴露量为 0.083 μg/（kg·BW)[19]，占汞的 ADI 的

14.5%。汞的膳食暴露量较低，即使叠加三种食药物质的暴露量，汞暴露风险仍处于较低水平。

2.3.5　铜的暴露风险评估　黄芪中的铜暴露量高于其他重金属，原因是黄芪中铜含量高，但远低于铜的ADI，表明铜的暴露风险较低。

3　讨　论

本研究对陕西地产黄芪、杜仲叶和山茱萸中铅、镉、砷、汞和铜的含量进行检测，结果显示杜仲叶中铅含量高于黄芪和山茱萸，为 1.368 mg/kg，有研究对 321 篇文献中九种食药物质中铅含量进行 meta 分析，得到杜仲叶中铅含量均值为 2.31 mg/kg，高于山茱萸、黄芪等其他七种[2]，应关注杜仲叶的生长环境和加工过程，降低铅污染。不同食药物质中重金属含量分布有所不同，杜仲中铅、镉、砷、汞高于山茱萸和黄芪，山茱萸中砷含量低于杜仲叶和黄芪，黄芪中铜含量高于杜仲和山茱萸，但铅、镉、砷、汞均为最低。有研究表明，黄芪对铜有较强的富集作用[20]。铜是植物生长过程中的必要元素，因此 黄芪、杜仲叶和山茱萸中铜的含量均高于铅、镉、砷、汞。

用单因子污染指数和内梅罗综合污染指数评价重金属污染程度。黄芪、杜仲叶和山茱萸中中铅、镉、砷、汞、铜的单项污染指数均为优良水平。黄芪和山茱萸中综合污染指数处于安全水平。杜仲叶的综合污染指数为 0.79，已超过安全水平，主要来源于铅和汞的污染。杜仲叶属于叶类植物药材，在生长过程中长时间、大面积暴露于环境中，可能导致其受污染程度较严重，对于杜仲叶生长的环境污染情况应加以关注。也可能与不同种类食药物质对重金属的富集能力不同有关，有研究表明叶类植物重金属富集程度高于根茎类植物[21]。提示在杜仲叶种植和加工过程中，应关注铅和汞的污染。

黄芪、杜仲叶和山茱萸中的暴露风险评估结果显示，食用途径的暴露量高于药用途径，但两种途径下的重金属健康风险均在可接受范围内。本研究的暴露风险评估有一定不确定性，一是使用了《2020 版药典》中推荐摄入量的上限值；二是无论作为药物服用还是膳食摄入，食药物质中重金属均有一定的溶出率，本研究中未将溶出率纳入暴露量的计算，以上两种不确定性均会对暴露水平有所高估，但同时保证了评估结果的保守性。

利益冲突声明　本研究不存在任何利益冲突

参考文献

[1] 国家卫生健康委．关于党参等 9 种新增按照传统既是食品又是中药材的物质公告 [EB/OL]．[2025-10-11]. http://www.nhc.gov.cn/sps/s7892/202311/f0d6ef3033b54333a882e3d009ff49bf.shtml.
National Health Commission. Announcement on the addition of 9 new substances, including codonopsis pilosula, that are traditional Chinese medicinal materials as well as food[EB/OL]. [2025-10-11]. http://www.nhc.gov.cn/sps/s7892/202311/f0d6ef3033b54333a882e3d009ff49bf.shtml.(In Chinese)

[2] 包汇慧，纪晓宁，吴难，等．9 种药食同源物质重金属及农药污染状况 Meta 分析 [J]．中国食品卫生杂志，2023，35（12）：1695-1703.
Bao HH, Ji XN, Wu N, et al. Meta analysis of heavy metal and pesticide pollution status of nine medicinal and edible substances[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2023, 35 (12): 1695-1703.(In Chinese)

[3] 赵永胜，石文鑫，郝变青．山西省黄芩，远志重金属污染与安全性评价[J]．山西农业科学，2024，52（6）：86-94.
Zhao YS, Shi WX, Hao BQ. Pollution and safety assessment of heavy metals in scutellaria baicalensis and polygalae radix in Shanxi Province [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2024, 52(6): 86-94.(In Chinese)

[4] 黄小兰，谭春蓉，朱德文，等．食药两用物质天麻、灵芝的外源性污染物分析[J]．化学试剂，2024，46（3）：73-80.
Huang XL, Tan CR, Zhu DW, et al. Analysis of exogenous pollutants in gastrodia elata B1.and ganoderma lucidum of medicinal and edible homologous substances[J]. Chemical Reagents, 2024, 46(3): 73-80.(In Chinese)

[5] 国家药典委员会．中华人民共和国药典：一部[M]．北京：中国医药科技出版社，2010.
National Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China:1 part [M]. Beijing: China Medical Science and Technology Press, 2010.(In Chinese)

[6] 钟源，赵蓉，李前慧，等．基于污染指数法的 8 种中药材重金属污染情况文献研究 [J]．中国中医药信息杂志，2018，25（5）：101-104.
Zhong Y, Zhao R, Li QH, et al. Literature research in contamination index method to evaluate heavy metal contamination in eight kinds of Chinese materia medica [J]. Chinese Journal of Information on Traditional Chinese Medicine, 2018, 25(5): 101-104.(In Chinese)

[7] 刘志婷，黄盼盼，黄琼，等．广东省灵芝、铁皮石斛、西洋参三种食药物质重金属暴露风险评估 [J]．中国食品卫生杂志，2024，36（4）：414-419.
Liu ZT, Huang PP, Huang Q, et al. Risk assessment of the heavy metals by ganoderma lucidum, dendrobium officinale, and American ginseng in Guangdong Province[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2024, 36(4): 414-419.(In Chinese)

[8] 国家卫生和计划生育委员会．GB 5009.268-2016 食品安全国家标准 食品中多元素的测定[S]．北京：中国标准出版社，2016.
National Health and Family Planning Commission. GB 5009.268-2016 National standard for food safety determination of multi-elements in food [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.(In Chinese)

[9] WHO. Evaluation of certain food additives and contaminants (Seventy-third report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives)[R]. Geneva: WHO, 2011.

[10] WHO. Evaluation of certain food additives and contaminants(Seventy-second report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food

（下转第 4309 页）

Cross-Sectional study of adults in the United States[J]. International Journal for Vitamin and Nutrition Research, 2024, 95(1): 36625.

[12] Laaksi A, Kyrölainen H, Pihlajamäki H, et al. Effects of vitamin D supplementation and baseline vitamin D status on acute respiratory infections and cathelicidin: a randomized controlled trial [J]. Open Forum Infect Dis, 2024, 11(9): ofae482.

[13] 赵雨芳,周笑,周兰芳,等. 呼吸道合胞病毒感染喘息患儿血清细胞因子和 25-(OH)D3 及对哮喘复发的预测价值[J]. 中华医院感染学杂志,2022,32(20):3166-3170.
Zhao YF, Zhou X, Zhou LF, et al. Predictive value of serum cytokines and 25- (OH)D3 for asthma recurrence in children with respiratory syncytial virus infection [J]. Chinese Journal of Nosocomiology, 2022, 32(20): 3166-3170.(In Chinese)

[14] Bleakley AS, Licciardi PV, Binks MJ. Vitamin D modulation of the innate immune response to paediatric respiratory pathogens associated with acute lower respiratory infections[J]. Nutrients, 2021, 13(1): 276.

[15] Wimalawansa SJ. Physiology of vitamin D-Focusing on disease prevention[J]. Nutrients, 2024, 16(11): 1666.

[16] Lech MA, Warpechowski M, Wojszel A, et al. Vitamin D status among patients admitted to a geriatric Ward-Are recommendations for preventing its deficiency effective enough?[J]. Nutrients, 2024, 16 (2): 193.

[17] Kauser H, Palakeel JJ, Ali M, et al. Factors showing the growing relation between vitamin D, metabolic syndrome, and obesity in the adult population: a systematic review [J]. Cureus, 2022, 14 (7): e27335.

[18] 黄杰,黄诗婷,李艳艳,等. 超重肥胖与维生素 D 营养状况的交互作用对儿童肌肉减少症的影响[J]. 现代预防医学,2024,51(17):3123-3127.
Huang J, Huang ST, Li YY, et al. Interaction between overweight/obesity and vitamin D status and its im-pact on sarcopenia in children [J]. Modern Preventive Medicine, 2024, 51 (17): 3123-3127.(In Chinese)

[19] He SB, Chen HT, Yi YF, et al. A novel bioinformatics strategy to uncover the active ingredients and molecular mechanisms of Bai Shao in the treatment of non-alcoholic fatty liver disease[J]. Frontiers in Pharmacology, 2024, 15: 1406188.

[20] White JH. Emerging roles of vitamin D-Induced antimicrobial peptides in antiviral innate immunity[J]. Nutrients, 2022, 14(2): 284.

[21] Contreras-Bolívar V, García-Fontana B, García-Fontana C, et al. Mechanisms involved in the relationship between vitamin D and insulin resistance: impact on clinical practice[J]. Nutrients, 2021, 13 (10): 3491.

[22] Ning P, Jiang XB, Yang J, et al. Mitophagy: a potential therapeutic target for insulin resistance [J]. Frontiers in Physiology, 2022, 13: 957968.

[23] Cordeiro A, Campos B, Pereira SE, et al. Inadequacy of vitamin D nutritional status in individuals with metabolically unhealthy obesity phenotype: the relevance of insulin resistance[J]. Diabetes, Metabolic Syndrome and Obesity: Targets and Therapy, 2020, 13: 4131-4139.

收稿日期:2025-06-09

(上接第 4295 页)

Additives)[R]. Geneva: WHO, 2011.

[11] WHO. Safety evaluation of certain contaminants in food. Prepared by the Sixty-fourth meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA)[R]. Geneva: WHO, 2006.

[12] 周广涛,黄蒙蒙,栾永福,等. 人参健脾丸中重金属及有害元素的测定、风险评估及最大限量理论值研究[J]. 中草药,2023,54(16):5225-5232.
Zhou GT, Huang MM, Luan YF, et al. Determination,risk assessment and theoretical value of maximum limit of heavy metals and harmful elements in Renshen Jianpi Pills [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2023, 54(16): 5225-5232.(In Chinese)

[13] 王绪卿,吴永宁,陈君石,等. 食品污染监测低水平数据处理问题[J]. 中华预防医学杂志,2002,36(4):278-279.
Wang XQ, Wu YN, Chen JS, et al. Problems of low-level data processing for food contamination monitoring [J]. Chinese Journal of Preventive Medicine, 2002, 36(4): 278-279.

[14] WHO. Second workshop on reliable evaluation of low-level contamination of food[R]. Geneva: WHO, 1995.(In Chinese)

[15] 雍凌,王彝白纳,李耀磊,等. 我国居民中药材砷暴露风险评估[J]. 中国中医药信息杂志,2018,25(4):5-9.
Yong L, Wang YBN, Li YL, et al. Risk assessment of Arsenic exposure by Chinese materia medica in Chinese population [J]. Chinese Journal of Information on Traditional Chinese Medicine, 2018, 25(4): 5-9.(In Chinese)

[16] 毛伟峰,杨大进,隋海霞,等. 我国成人居民膳食中铅暴露风险评估[J]. 中国食品卫生杂志,2016,28(1):107-110.
Mao WF, Yang DJ, Sui HX, et al. Risk assessment of dietary Lead exposure in Chinese adult population [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2016, 28(1): 107-110.(In Chinese)

[17] Song Y, Wang YBA, Mao WF, et al. Dietary Cadmium exposure assessment among the Chinese population [J]. PLOS One, 2017, 12 (5): e0177978.

[18] 李筱薇,高俊全,王永芳,等. 2000 年中国总膳食研究 - 膳食砷摄入量[J]. 卫生研究,2006,35(1):63-66.
Li XW, Gao JQ, Wang YF, et al. 2000 Chinese total dietary study-the dietary arsenic intakes [J]. Journal of Hygiene Research, 2006, 35(1): 63-66.(In Chinese)

[19] 蔡金良. 中国居民经膳食汞暴露致心血管疾病负担研究[D]. 武汉:华中科技大学,2022.
Cai JL. Burden of cardiovascular disease attributed to dietarymercury exposure in Chinese residents [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.(In Chinese)

[20] 李彩虹,王彩艳,王晓静,等. 宁夏道地黄芪重金属残留特征及污染评价[J]. 北方园艺,2016(21):171-174.
Li CH, Wang CY, Wang XJ, et al. Residual characteristics and pollutional risk assessment of heavy metal in Ningxia original radix astragali[J]. Northern Horticulture, 2016(21): 171-174.(In Chinese)

[21] 赵连华,杨银慧,胡一晨,等. 我国中药材中重金属污染现状分析及对策研究[J]. 中草药,2014,45(9):1199-1206.
Zhao LH, Yang YH, Hu YC, et al. Current situation analysis and countermeasures on contamination of heavy metal in traditional Chinese medicinal materials in China [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2014, 45(9): 1199-1206.(In Chinese)

收稿日期:2025-04-29